

交通信息工程技术

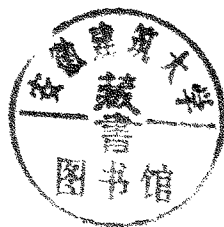
徐志刚 编著

# 路面破损

图像自动识别技术

# 路面破损图像自动识别技术

徐志刚 编著



西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了路面破损图像自动识别技术的理论、方法以及路面自动检测系统的集成和软件开发方法。全书共6章,首先简要介绍了路面破损图像检测系统及路面破损图像自动识别算法的国内外研究现状,以及道路养护行业对路面破损自动识别技术的实际需求;然后在此基础上详细论述了路面破损图像特征分析、特征提取、特征融合、破损目标提取、目标精确分割、目标几何参数测量、破损分类等内容;最后详细阐述了编者所开发的路面破损图像自动检测系统的结构、功能及集成软件开发等内容。

本书内容系统,重点突出,理论与实践并重,既可以作为交通信息工程及控制、道路与铁道工程等高年级本科生、研究生的参考教材,也可以作为道路检测与养护行业的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

路面破损图像自动识别技术/徐志刚编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5606-4510-0

I. ①路… II. ①徐… III. ①路面衰坏—图像处理—自动识别—研究  
IV. ①U418.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 155873 号

策划编辑 刘玉芳

责任编辑 刘玉芳 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 北京虎彩文化传播有限公司

版 次 2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印张 10.5

字 数 207千字

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-4510-0/U

**XDUP 4802001-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

# 前 言

近年来,随着我国公路网的不断扩大,公路养护和管理问题日渐突出。为适应大规模、高效率和高质量的公路养护管理要求,路面管理系统(Pavement Management System, PMS)得到了广泛的推广和应用,它改变了传统落后的公路管理模式,使公路管理决策更加客观化、信息化和科学化。路面管理系统的有效性依赖于各种数据的准确、实时获取,而路面破损数据是评价路面质量状况的关键指标之一。目前,国内外已研发了多种路面图像自动采集与处理系统,可在线获取路面图像,离线进行路面破损图像自动识别。但是这些系统普遍存在“成像照度不均匀”、“识别算法通用性差”、“运行效率不高”等问题,成为影响该系统推广应用的“瓶颈”。

路面破损图像自动识别技术多年来一直是交通信息工程与模式识别领域的经典难题,受到相关研究者的广泛关注。由于路面图像的多纹理性、多目标性、目标的弱信号性和图像光强的多变性,使得路面破损目标的识别难度相对较大。现有算法大多是建立在路面图像质量好、裂缝目标清晰的基础上而开发的,缺乏对复杂环境的适应性,难以满足工程应用的实际需求。

针对以上问题,本书在国内外相关研究的基础上,对基于多特征融合的路面破损图像自动识别方法进行了系统化研究。该方法对路面破损图像的灰度、纹理、边缘、形状等多种特征进行了定性和定量分析,继而选择出能够准确描述路面破损目标特性的关键特征,并通过多种融合规则和融合方法对这些特征进行融合,最终实现路面图像的准确分类和破损目标的精确分割。本书研究成果拓展了多特征融合理论在交通领域的应用,同时为公路养护管理部门提供更为科学、实用的路面破损数据处理方法和工具。

全书共6章。第1章介绍了国内外路面破损检测系统的研究进展;第2章介绍了路面破损图像特征分析及处理流程;第3章阐述了融合边缘与灰度特征的道路标线精确分割方法;第4章提出了融合纹理与形状特征的路面破损图像初始分类方法;第5章重点分析了基于D-S证据理论与多特征融合的裂缝类目标检测方法和相关算法设计;第6章介绍了破损图像自动检测系统集成及软件开发方法。

长安大学徐志刚副教授撰写了所有章节内容，并负责全书的统稿。课题组的车艳丽、李金龙、龙可可同学参与了本书的编写和校勘工作。本书的出版得到了陕西自然科学基金(S2013JC9397)、交通部基础应用项目(2015319812060)、国家自然科学基金(60902075)、中央高校科研业务费项目(310824163202、300102248403)的资助，在此向相关部门表示深深的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 路面破损检测系统国内外研究进展 .....	3
1.2 路面破损图像自动识别算法国内外研究进展 .....	8
1.3 路面破损图像自动识别技术存在的难点 .....	14
1.4 基于多特征融合的图像目标识别技术研究进展 .....	17
本章小结 .....	22
第 2 章 路面破损图像特征分析及处理流程 .....	23
2.1 路面破损类型及形成机理 .....	23
2.2 路面破损图像特征分析 .....	32
2.3 路面破损图像处理流程 .....	41
本章小结 .....	42
第 3 章 融合边缘与灰度特征的道路标线精确分割 .....	43
3.1 道路标线分割的意义及特征分析 .....	43
3.2 基于灰度特征的道路标线分割算法 .....	51
3.3 基于直线边缘的道路标线分割算法 .....	54
3.4 融合灰度与直线边缘的道路标线分割 .....	70
3.5 算法性能对比 .....	71
本章小结 .....	72
第 4 章 融合纹理与形状特征的路面破损图像初始分类 .....	73
4.1 路面破损图像初始分类概述 .....	73

4.2	路面破损图像的融合增强 .....	74
4.3	路面破损图像模式的初始分类方法 .....	77
	本章小结 .....	90
<b>第5章</b>	<b>基于D-S证据理论与多特征融合的裂缝类目标检测 .....</b>	<b>91</b>
5.1	裂缝类路面破损图像特征分析 .....	91
5.2	基于灰度特征的路面裂缝检测目标识别 .....	92
5.3	基于多尺度脊边缘融合的路面裂缝目标识别 .....	102
5.4	基于D-S证据理论和多特征的路面裂缝融合检测 .....	109
5.5	算法性能评估及经典算法对比分析 .....	123
5.6	路面裂缝几何参数自动测量算法 .....	127
	本章小结 .....	129
<b>第6章</b>	<b>路面破损图像自动检测系统集成及软件开发 .....</b>	<b>130</b>
6.1	路面破损图像自动检测系统集成 .....	130
6.2	路面破损自动识别软件开发 .....	136
6.3	软件开发中的一些关键技术 .....	143
	本章小结 .....	149
	<b>总结及展望 .....</b>	<b>150</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>152</b>

# 第1章 绪 论

“乐游原上清秋节，咸阳古道音尘绝”，“蜀道之难，难于上青天”。在中国古代，道路承载着深厚的历史文化记忆，是古诗词中常用的抒发离别情怀与征途感慨的象征。同时，道路作为国家政治、军事、经济命脉的重要角色，数千年来也一直未变。早在西周（公元前1046—前771），我国就有了类似于今天的道路。《诗经·小雅·大东》中云：“周道如砥，其直如矢”，意思是周朝的道路像磨刀石一样坚实平坦，如箭一般笔直。周朝开创了划分城市道路与郊外道路的先河。郊外道路分为路、道、涂、畛、径五个等级，与之对应的则是齐备的服务设施：“凡国野之道，十里有庐，庐有饮食；三十里有宿，宿有路室，路室有委；五十里有市……”。秦汉时期，道路以政治、军事用途为主要功能。公元前212年，秦始皇为防御匈奴修建了世界上第一条高速公路——秦直道，该道路全长700多公里，南北走向，为求其“直”，修筑过程中遇山开山、遇沟填沟，并且越过了黄河，其平、宽、直，都符合现代高速公路的特征，秦朝骑兵沿着直道，三天三夜即可驰抵阴山脚下。汉朝在秦朝道路的基础上扩建延伸，构建了以京城为中心，向四面辐射的交通网。在邮驿与管理制度上，汉朝也继承并改善了秦朝制度。在唐代（618—907），京城长安成为全国陆路交通枢纽，并且对外交往频繁。洛阳、扬州、泉州、广州等城市，也随着道路建设的发展，逐渐成为国内外交通的重要中转站。唐、宋及明、清时期，商品经济得到较大发展，道路开始逐渐具有通商的功能。清末，1901年第一辆汽车驶入中国，我国才开始具有真正现代意义上的公路<sup>[2]</sup>，由中国军队修建的滇缅公路（又称“史迪威公路”）连接印度东北部的雷多和中国云南的昆明，在枪林弹雨中为中国抗日战场运送了5万多吨急需物资，被称为“抗日生命线”。

道路不但具有重大的政治和军事意义，同时对推动国家经济建设和工农业现代化建设的高速发展发挥着不可替代的作用。为了提高国家的基础设施和交通运输的发展水平，世界各国普遍都很重视公路交通的建设。20世纪80年代改革开放后，我国开始大力投资国、省、县干线公路，城市道路、农村公路的建设，这些基础设施的建设带动了汽车、钢铁、能源、化工、建筑、旅游等相关产业的发展，提供了大量就业机会，推动了中国近30年的高速增长，创造了世界称道的“中国奇迹”。2008年11月，国家为应对金融危机推出扩大内需以刺激经济增长的方案，出台了总额约4万亿元人民币的一揽子投资计划，在这些投资中，约有15000亿元被投入到基础设施建设中。在每年的政府工作报告上，对公路水运的投资每年都超过万亿元。到2017年年底，全国公路总里程达477.96万公里，比上年末增加了7.82万公里，其中，高速公路达10.23万公里，超过美国的10万公里<sup>[3]</sup>，居世界第一。



20世纪70年代中期,西方发达国家在经历了大规模的公路建设之后,突如其来的公路养护巨大需求、养护资金短缺和公众对快速安全出行要求的提高,使这些国家的公路养护管理部门遇到了前所未有的新问题。面对突然到来的大规模公路养护时代,西方国家投入了巨大的人力、物力和财力,实施了系统的科学研究,研发了新的检测技术、检测装备,科学的决策理论、决策方法,基于全寿命的养护设计技术和新型养护材料,建立了现代养护决策制度体系。通过新技术的广泛应用,改变了传统的公路养护模式,缓解了公路养护的压力,使公路养护走上了可持续发展的道路<sup>[4]</sup>。

我国在不久的将来,将遇到与西方国家当年一样的问题,即受土地、环境、资源、人口的限制,道路规模的增长将趋于平缓。可以预见,在未来30年内,我国公路的建设速度将逐步放缓,同时公众对道路的质量和服务要求将进一步提高,因此公路的养护问题将日益严峻,大量在役公路在交通荷载和自然因素的作用下,将逐渐产生各种病害,严重影响路面的承载能力、耐久性,以及车辆的行驶速度、燃油消耗、行车安全和舒适性。近年来,我国每年用于公路养护和翻修的费用已接近700亿元,随着路网密度的增加和我国公共需求的增长,以及物流系统的进一步完善,这一费用将进一步增加<sup>[6]</sup>。2016年年底,在收费公路上仅用于公路养护的支出达476.3亿元,公路改扩建支出达228.7亿元。

交通运输部早在2001年就颁布了交通行业标准JTJ 073.2-2001<sup>[7]</sup>,用来规范沥青路面的养护作业,规范指出,养护部门必须加强路况巡视,掌握路面的使用情况,制定日常小修保养和经常性、预防性及周期性养护工程计划,以有效降低道路养护费用。为适应大规模、高效率和高质量的公路养护管理要求,路面管理系统(Pavement Management System, PMS)得到了广泛的推广和应用,它改变了传统落后的公路管理模式。路面破损自动识别技术是PMS中的一个重要环节,只有获得了准确的路面破损数据,PMS才能为路面的养护和修复提供一个高效、低成本的解决方案。目前,国内的路面破损检测主要靠人工巡视,不但劳动强度大、检测速度慢,而且十分危险。自20世纪80年代以来,随着现代光学技术和计算机技术的飞速发展,欧美等发达国家先后开发了基于激光测距和数字图像处理的多功能检测车<sup>[8-12]</sup>。这种检测车具有检测效率高、人为因素少、不影响交通的优点,在路面检测中得到了越来越多的应用。我国在这方面起步较晚,但是发展迅速,目前已接近世界先进水平<sup>[13]</sup>。由于路面图像具有以下特点<sup>[14]</sup>:①路面所处环境具有较强噪声(路面材料粒径噪声、交通标志白线、路面抛洒物、不均匀光线照度、遮挡阴影等干扰);②路面破损形式多样,采集图像的特征随地域、气候、天气、时间等条件的变化而千差万别;③摄像机安装在车身上,存在多个自由度的机械振动,导致路面图像出现扭曲、拖尾和模糊现象。现有的路面自动检测系统依然普遍存在实时性差、识别率低和分类难等缺点。目前,国内现有的路面调查方法在很大程度上还都依赖于人工,虽然近几年陆续引进了一些国外先进的路面检测系统,这些系统在图像采集方面已经趋近成熟,但在破损识别方面的应用效果并不理想,因此寻找一种简单、高效的破损图像识别算法和正确率高的路面破损图像自动分类方法仍然是当前急需解决的难题。

## 1.1 路面破损检测系统国内外研究进展

从20世纪70年代第一辆路面破损自动检测设备(法国的GERPHO系统)诞生到现在,国外的路面自动检测系统大致经历了近40年的发展和更新换代,根据图像的采集方式,大致可分为以下六个阶段的产品。

### 1. 基于模拟摄影技术的路面快速检测系统

基于模拟摄影技术的路面快速检测系统最早起源于20世纪60年代末期,由日本的PASCO公司开始研发,但最早研制成功并投入使用的是法国LCPC道路管理部门开发的GERPHO系统。该系统的关键技术是同步摄影数据采集技术,系统采用35 mm电影胶片,由高速摄像机和车辆定位系统来实现路面破损图像的同步采集。路面破损图像胶卷经过冲洗,通过室内判读设备能再现路面损坏状况,这样技术人员即可在实验室判读各种路面病害,并将判读结果人工输入到数据库<sup>[4]</sup>。法国GERPHO系统的研制成功,对公路养护历史来说具有划时代的意义,它不但彻底改变了路面现场检测主要以人工为主的状况,而且极大地减轻了检测工作对交通流的影响。但由于该系统只能在夜间工作,存在实验室后期处理工作量大、耗时过长、检测功能单一等缺点,因此未能得到普及。

### 2. 基于模拟视频技术的路面快速检测系统

随着模拟视频技术与磁带存储技术的发展,20世纪80年代出现了基于模拟视频技术的路面快速检测系统。该系统与基于模拟摄影技术的系统相比,在硬件和功能上均有较大提高,其最主要的技术特点表现为:

(1) 使用当时最先进的模拟视频技术,通过高性能的模拟摄像机对路面损坏数据进行采集,路面图像全部存储在高密度的录像带中。

(2) 在路面破损检测的基础上,又逐渐增加了路面平整度、路面车辙和前方图像等数据的检测功能。

(3) 后期图像数据处理软件在功能上得到较大提升。

该类检测设备中最具代表性的是日本的Komatsu系统。该系统采集图像的最大分辨率可达到 $2048 \times 2048$ ,系统利用安装在检测车两侧的激光扫描器发出的氩激光对路面进行照明,通过安装在前保险杠上的模拟摄像机捕获路面图像,所有视频全部存储在高密度的录像带中,每秒可存储100 Mb的图像数据<sup>[15]</sup>。Komatsu系统代表了当时最先进的硬件技术,但是由于该系统不能识别裂缝类型,且为了控制光照条件,只能在夜间工作,车速必须控制在10 km/h内,因此未得到推广。

### 3. 基于高速面阵数字相机的路面快速检测系统

20世纪90年代中期以后,CCD数字成像技术和计算机图像处理技术的飞速发展,促

进了以低成本、高分辨率、高采集速率的数字相机为采集设备的路面快速检测系统的诞生。这种数字相机与模拟视频摄像机的区别是：数字相机将物体图像的灰度或者色彩直接转成像素矩阵形式的数据，无需经过模拟/数字转换，其空间分辨率和图像采集速率要远远高于模拟视频摄像机。该类系统具有以下优点：

(1) 采用面阵 CCD 传感器对路面图像进行捕获，通过专用总线接口 (CameraLink、千兆网、PCIE 等接口) 直接将图片数据存储到计算机硬盘中。

(2) 采用图像压缩技术对采集的图像数据进行实时压缩存储，节省硬盘空间。

(3) 采用 GPS 定位技术和陀螺仪惯性系统对路线几何线型及横纵坡数据进行采集。

(4) 在后期数据处理过程中，采用路面图像预处理技术，提高了图像数据的处理速度和准确率。

这一时期比较成功的商业化产品有加拿大 RoadWare 公司开发的 ARAN 系统、澳大利亚 ARRB 公司开发的 Hawkeye2000 系统和瑞典 Ramboll 公司研制的 PAVUE 系统。这种系统的缺点是，由于数字相机的采集速率较高，成像曝光时间短，需增加人工照明光源 (高速闪光灯或者 LED 恒光源) 才能获得较好的拍照效果<sup>[4]</sup>。

#### 4. 基于高速线扫描数字相机和激光照明技术的路面快速检测系统

2000 年以后，基于高速线扫描数字相机和激光照明技术的路面快速检测系统在路面破损检测、车辙检测、路面辅助照明及图像识别等方面取得了巨大突破，其主要技术特征如下：

(1) 广泛采用线扫描相机技术和红外激光照明技术，使图像质量更加稳定。

(2) 采用线激光车辙检测技术提高了车辙检测精度和检测系统的稳定性。

在第四代快速检测设备中，具有代表性的是加拿大 INO 公司生产的 LRIS 系统<sup>[16]</sup> 和美国 ICC 公司生产的多功能路况检测系统<sup>[17]</sup>。如图 1.1 所示，INO 公司的 LRIS 系统采用两部高速、高分辨率线阵相机与两部大功率线激光源，按照交叉对称式的光学结构进行同步采集，两部线阵相机可以覆盖近 4 m 宽的路面，在 100 km/h 的工作速度下，该系统所采集的图像的横向最小分辨率可达 0.5 mm。由于采用了大功率线激光源，LRIS 系统可以全天候使用，并且消除了路侧物体、高架桥及检测车本身造成的阴影。

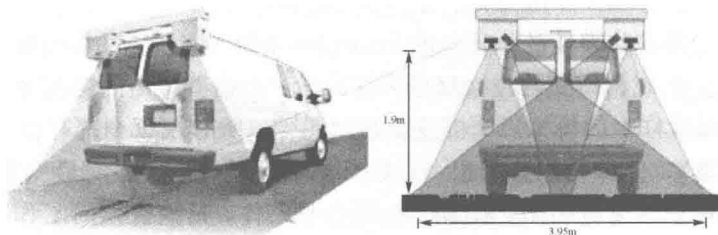


图 1.1 INO 公司的 LRIS 系统

### 5. 基于热成像技术的路面破损检测系统

基于热成像技术的路面破损检测系统采用红外热成像相机进行图像采集<sup>[18]</sup> (如图 1.2 所示), 其主要技术特征如下:

(1) 由于路面破损处与完好路面相比, 反光率较小, 路面破损处的表面温度与完好路面温度相差较大, 两种图像形成强烈的对比。

(2) 由于红外图像中路面纹理信息较弱, 因此图像处理算法相对简单。

其缺点是红外热成像相机成本较高, 图像采集速率和分辨率都有待提高, 同时受天气影响较大, 湿滑的路面无法进行检测。

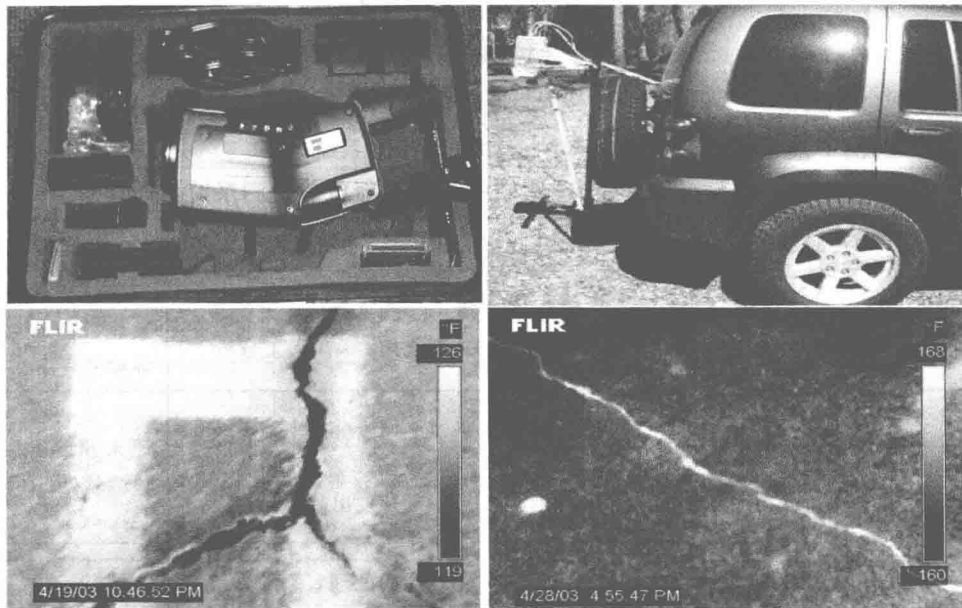


图 1.2 基于热成像技术路面破损检测系统

### 6. 基于 3D 激光扫描技术的路面破损检测系统

基于 3D 激光扫描技术的路面破损检测系统采用 3D 激光扫描技术获取路面的细微 3D 轮廓<sup>[19]</sup>, 该系统采用线激光直射路面, 用面阵相机拍摄激光线在路面上的投影, 然后通过图像处理算法获得路面上每一个点的高程差。3D 激光扫描技术的特点是获得的图像是路面的点云集合, 不含复杂的纹理和颜色信息, 给后期的图像处理带来了便利。该系统目前存在的问题是检测数据量大, 因此可靠性仍需进一步提高, 但是代表了未来路面检测系统的发展方向。

图 1.3 所示为 3D 激光扫描技术获取的路面图像。

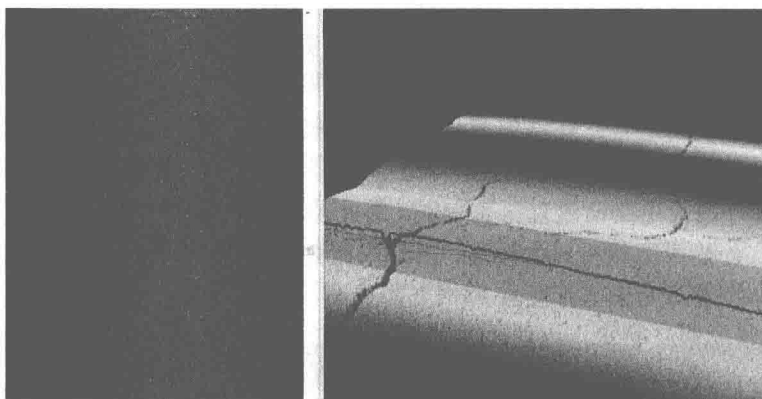


图 1.3 3D 激光扫描技术获取的路面图像

表 1.1 列出了近年来全球比较知名的道路自动检测系统。

表 1.1 近年来全球比较知名的路面自动检测系统

系统	制造商	国家	图像采集技术	制造商规范	备注
Argus	Schniering ING	德国	1 部模拟视频摄像机和同步闪光灯	图像存储在录像带之后, 采用人工分析	属于人工分析系统, 自动系统还在开发中
Greenwood	Greenwood Engineering	丹麦	1 部线扫描数字相机, 采用 LED 恒光灯进行补光	像素分辨率为 2 mm, 最高车速达 80 km/h, 未开发出软件	未开发出裂缝检测软件
HARRIS	TRL/HA	英国	3 部线扫描数字相机, 卤光灯照明补光	后处理, 像素分辨率为 2 mm, 最高车速达 80 km/h, 检测宽度为 2.9 m	以 TRACS/TTS 为参考原型
PAVUE	Ramboll	瑞典	4 部面阵高清数字相机, 采用闪光灯同步补光	实时处理, 最高车速达 90 km/h, 检测宽度为 3.2 m	
RAV	WDM Ltd	英国	4 部标准模拟视频摄像机, 采用闪光灯同步补光	实时处理, 像素分辨率为 2 mm, 最高车速可达 90 km/h, 检测宽度为 3.2 m	

续表

系统	制造商	国家	图像采集技术	制造商规范	备注
TTS	Jacobs-Babtie	英国	4 部标准模拟视频摄像机, 采用闪光灯同步补光	实时或是后处理, 最高车速可达 90 km/h, 检测宽度为 3.2 m	采用 Ramboll 系统的软件
ADVantage	Fugro	美国	4 部面阵高清数字相机, 采用闪光灯同步补光	实时处理, 像素分辨率为 3 mm, 最高车速可达 110 km/h, 检测宽度为 4.1 m	系统夜间工作, 裂缝检测软件与 WayLink 密切相关
ARAN	Roadware/ DCL	加拿大	4 部面阵高清数字相机, 采用闪光灯同步补光	后处理, 检测裂缝大于 3mm, 最高车速达 80 km/h, 检测宽度为 4.0m	人工干预能提高软件的裂缝识别性能
ARIA	MHM Associates Inc	美国	标准模拟视频	图像数字化、后处理检测裂缝	该系统当前处理状态不明确
Laser VISION	GIE Technologies Inc	加拿大	6 部线激光摄像机, 后面 2 个, 侧边 4 个	后处理, 大概 330 像素, 最高车速达 72 km/h, 检测宽度为 3.6 m	非可见光系统, 纵向分辨率低
Pathrunner	Pathway Services Inc	美国	标准模拟视频	半自动裂缝测量	非全自动
uniAMS	Ashara Systems	美国	数字视频摄像机, 自然光补光	后处理, 像素分辨率为 0.5 mm	系统支持用户车辆, 未规定光照
Hawkeye 2000 Series	ARRB	澳大利亚	数字高清相机和同步闪光灯	用图像分析软件后处理, 最高车速达 110 km/h, 检测宽度为 2.7 ~4.0 m	
IIV	Hanshin Expressway Public Corporation	日本	线激光作为光源, 2 个 CCD 摄像机检测车辙, 2 个 CCD 摄像机检测坑槽和裂缝	三角测量原理, 测量车辙误差为 3~4 mm, 用二值和差分处理方法检测坑洞裂缝	非基于图像的原理
RoadCrack	CSIRO	澳大利亚	持续光照下的 4 部线扫描摄像机	实时处理, 像素分辨率为 1 mm, 车速可达 5~100 km/h, 检测宽度为 2.9m	系统限制车宽 2.5m

除了商业公司开发的路面快速检测系统之外,国外一些大学和研究机构也纷纷开发了自己的快速路面检测设备。比较有代表性的有:美国阿肯色大学 Wang 教授开发的 DHDV 检测车<sup>[20]</sup>,德州大学奥斯汀分校 Huang 和 Xu 教授开发的 CrackScope 系统<sup>[11]</sup>,犹他州立大学 Cheng 教授开发的路面破损自动检测系统<sup>[21]</sup>。

我国在 20 世纪 90 年代末开始进入这一领域,虽起步较晚,但是发展迅速,已经接近国际先进水平,目前比较出色的系统有:南京理工大学开发的 JG-1 路面状况智能检测系统<sup>[13]</sup>,北京公路科学研究院开发的 CiCS 路况快速检测系统<sup>[22]</sup>,武汉大学开发的 ZOYON-RTM 型车载智能路面检测系统<sup>[13]</sup>,长安大学开发的 CT-501A 型高速激光道路检测车<sup>[23]</sup>和道路综合信息采集车。

近年来,随着现代光学技术、计算机技术及传感器技术的飞速发展,国内外大量研究者和企业将这些新技术应用于路面破损图像全自动采集系统的研究与开发之中,使得路面破损图像采集技术已趋近于成熟,目前广大研究者正集中力量进行路面破损图像自动识别算法和路面管理软件的开发。

## 1.2 路面破损图像自动识别算法国内外研究进展

自 20 世纪 70 年代第一台路面快速检测系统诞生以来,国内外有关学者和研究人员就开始致力于路面破损图像自动识别算法的研究。近 50 年来,相关研究人员不断地将数字图像处理领域的新技术应用于路面破损图像的增强、目标分割、目标参数测量、目标分类等各个环节中,伴随着每一次数字图像处理技术发展的小高潮,都会有大量新的路面破损识别算法涌现。本书收集了自 1990 年以来国内外路面破损图像自动识别领域的大量文献,并对文献中的算法进行了整理和分析。

### 1. 路面破损图像的增强

由于光照不均匀、阴影遮挡等原因,路面破损图像经常出现畸变或者亮度分布不均匀的情况,再加上路面材料颗粒噪声、油污、水渍、道路标线等的影响,使得路面破损图像信噪比较低,而且路面裂缝等破损目标在整个图像中比例较小,裂缝信号很容易淹没在噪声背景之中,因此在对路面破损图像进行识别之前,通常需要对其进行增强处理,使破损目标具有更高的对比度,更易于识别。

为了消除路面破损图像的光照不均匀,Cheng 等<sup>[24]</sup>用原始路面图像减去经过低通滤波的模糊图像,得到一幅图像差,该图像差消除了光照的缓慢变换以及道路白线标记、轮胎印等大面积噪声,同时保留了裂缝信息。

高建贞等<sup>[25]</sup>提出了一种快速实用的灰度校正算法,也采用了类似的图像差方法对图像灰度进行校正。此类方法的缺点是在消除背景光照不均的同时,降低了破损对比度。

唐磊等<sup>[26]</sup>提出了一种基于多偏微分方程融合的增强算法,在路面图像的去噪、裂缝边缘锐化和增强裂缝等方面均取得了良好的效果,但是算法中的几个重要参数需要经过一定的统计分析才能获得,而且这些参数只能适用于同一条件下获取的路面图像,不具备通用性。

王兴建等<sup>[27]</sup>将灰度去噪模型、空间滤波去噪模型、裂缝特征去噪模型与几何特征去噪模型串联起来,构成了一个多级去噪模型,该模型在路面图像的去噪、裂缝信息提取等方面有一定改进,但是模型的参数不具备通用性。

闫茂德等<sup>[28]</sup>和刘玉臣等<sup>[29]</sup>将模糊理论应用于路面破损图像的增强,取得了较好的效果。

左永霞等<sup>[30]</sup>将小波包引入到路面图像降噪中,该算法将路面图像分解后,在每一级尺度上进行降噪处理。

张大奇等<sup>[31]</sup>将多尺度几何分析技术用于路面破损图像的增强,提出了一种自动脊波图像增强算法,该算法首先对图像进行 Ridgelet 变换,然后采用模糊熵和模糊散度对变换后的高频系数进行拉伸,最后通过 Ridgelet 逆变换得到增强后的图像。

李清泉<sup>[32]</sup>等采用电子印相机的原理,利用 Wallis 变换对路面破损图像进行掩模处理,在增强图像反差的同时又抑制了噪声,从而得到灰度均匀分布的路面破损图像。

## 2. 路面破损目标的分割

路面破损目标(裂缝、坑槽、麻面等)的分割是整个路面破损识别过程中的关键,目标分割的好坏直接影响到后期的路面破损分类和评估。由于沥青路面图像的多纹理性、多目标性、裂缝的弱信号性和图像光强的多变性,开发一种识别准确率高、通用性好和运算速度快的路面破损目标分割算法对广大研究者来说是一个重大挑战。近 30 年来,路面破损识别领域的大量文献都集中于该问题的研究,提出了大量分割算法,这些算法可大致分成以下 5 大类。

### 1) 基于阈值的分割

阈值分割是一种最古老、应用最广泛的图像分割算法,其原理为:选取一个合适的阈值  $T$ ,将灰度图像中每个像素  $g(x, y)$  按照灰度大小划分到背景和目标中。由于阈值分割算法简单有效、运算速度快,因此被广泛应用于路面破损的图像分割之中。

Kirschke 等<sup>[33]</sup>提出了基于直方图的路面破损图像阈值分割方法,首先将路面破损图像划分为不重叠的一些子块,通过这些子块的直方图特征将其划分为裂缝子块和非裂缝子块,该方法只能适用于较明显裂缝的识别。

Jitprasithsiri<sup>[34]</sup>对 Ostu 阈值、回归法、松弛因子法、Kittler 阈值四种路面破损图像阈值分割方法进行了对比,发现回归法的效果最好,但是回归法最大的缺点是:针对不同路面图像数据集,需要采用人工方式建立阈值回归模型,因此不具备通用性。

Oh 等<sup>[35]</sup>针对回归法的缺点提出了一种迭代的裁剪法,这种方法迭代地使用均值和方差去除噪声像素,保留裂缝像素,但这种方法不适合于弱对比度裂缝的识别。

Cheng 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于模糊集理论的路面破损图像阈值分割算法,首先使用一个



钝化掩模算子对原始图像进行模糊化,得到一幅低通滤波图像,然后用原始图像减去掩模图像得到一幅差分图像,最后通过模糊集理论得到一个全局阈值,并将差分图像进行二值化。该方法无法检测细微裂缝,并且耗时较长。

Cheng 等<sup>[36]</sup>提出了一种基于减少样本空间和插值的实时阈值分割算法。其基本思路是沥青路面图像的分割阈值与像素灰度的均值和方差明显相关,该算法首先建立一个巨大的样本空间  $S = p(\mu, \delta, t)$ , 其中  $\mu, \delta$  代表像素灰度的均值和方差,  $t$  代表人工最优阈值,通过去掉相似样本、减小样本空间可以提高算法的实时性,但是该算法仅通过像素灰度的均值和方差来确定阈值,未考虑裂缝的空间分布特性,其漏检率和误检率都很高。

孙波成等<sup>[37]</sup>使用一种掩模平滑法对含有大量噪音的路面图像进行增强,然后采用最大类间、类内距离准则对图像进行阈值分割,提取图像上的裂缝特征。从分割结果看,还存在一些孤立的噪点,并且裂缝边缘之间存在不连续的情况。

李清泉等<sup>[38]</sup>将路面破损图像由像素级转换成单元级,然后将图像分成一些不重叠的块(每一个块由多个单元组成),并利用临域差直方图来确定每一个块的分割阈值,最后根据裂缝的几何特征进一步去掉噪声点。该算法同样不适合于弱对比度裂缝的识别。

## 2) 基于边缘检测的分割

边缘检测是图像分割领域的一大通用技术,通过边缘检测可以快速提取图像中的有用信息。近 30 年来,大量简单而有效的边缘检测算子(例如 Robert 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、LOG 算子)被开发出来,但是这些算子大都是针对单一尺度的边缘检测,且大多数是针对阶跃边缘,而路面裂纹是一种多尺度的脊边缘,因此用这些传统的算子进行裂缝边缘检测的效果较差。Canny 算子被认为是最好的检测算子,该算子首先通过高斯滤波器对图像进行平滑,然后使用 4 个方向的 Mask 算子与原始图像作卷积,保留每个像素点上的卷积最大值以及该 Mask 的方向,最后通过两个阈值来确定这些点是否为边缘。针对裂缝破损的边缘特性,国内外研究者提出了多种检测算法。

伯绍波等<sup>[39]</sup>、冯永安等<sup>[40]</sup>、李晋惠等<sup>[41]</sup>设计了多个方向的 Sobel 算子对沥青路面图像进行卷积,取最大响应值为边缘点,然后对图像进行阈值分割得到裂缝目标。该算法操作简单、边缘漏检率低,但是易产生伪边缘,而且阈值不易确定。

张娟等<sup>[14]</sup>认为边缘检测方法中仅将灰度变化的幅度作为局部边缘提取的主要度量是存在问题的,为此提出采用相位编组法进行裂缝提取。该算法利用边缘的方向信息,将空间上相邻方向上相近的边缘合并在一起,有利于检测出有弱对比度的裂缝及细小裂缝,但该算法产生的伪裂缝较多。

Huang 和 Xu<sup>[11]</sup>提出了一种基于 GCA 的边缘检测算法,将路面图像划分为若干个大大小为  $8 \times 8$  的网格,通过检测这些网格边界上是否存在明显“波谷”来判别这些网格内是否含有裂缝,若存在明显“波谷”,则以边界上的最小灰度值作为种子点,然后通过对这些种子点进行校验和跟踪,得到最终的裂缝。